تاثیر ترکیبات بین فلزی بر استحکام جوش‌های غیرهمجنس اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلومینیم/فولاد*

اسکندر فریدونی[۱]   مجتبی موحدی[۲]   امیرحسین کوکبی[۳]

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر ترکیبات بین فلزی بر استحکام جوش‌های اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلومینیم- فولاد بوده است. متغیرهای فرایند، سرعت چرخشی و زمان ماند ابزار بودند. بررسی‌های ریزساختاری فصل مشترک اتصال توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی انجام پذیرفت. نتایج آزمون کشش-برش نشان داد که در تمامی سرعت‌های چرخشی مورد استفاده، استحکام اتصالات با افزایش زمان ماند، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در زمان‌های ماند مشابه، سرعت‌های چرخشی بالاتر منجر به دست‌یابی به اتصالات مستحکم‌تری گردید. مشاهدات ریزساختاری فصل مشترک اتصال، نشان داد که رشد ضخامت لایه بین فلزی تا ۵ میکرومتر منجر به افزایش استحکام جوشها می‌گردد.

واژه‌های کلیدی Al-۵۰۸۳؛ St-۱۲، جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای، ترکیبات بین فلزی، استحکام کششی- برشی.

The Effect of Intermetallic Compounds on the Strength of Dissimilar Friction Stir Spot Welded Al/Steel Joints

E. Fereiduni   M. Movahedi   A. H. Kokabi

Abstract
The aim of the present study is to investigate the effect of Al-Fe intermetallic compounds on the strength of friction stir spot welded (FSSW) joints. The tool rotational speed and dwell time were the studied process parameters. The microstructure of the joint interface was characterized using optical and scanning electron microscopes. Tensile-shear testing results showed that the strength of the welds improved with the enhancement of dwell time for all of the applied rotational speeds. Furthermore, for a given dwell time, higher rotational speeds led to stronger joints. Microstructural observations revealed that the strength of the welds increased with the growth of the intermetallic layer thickness up to 5 µm.

Key Words Al-5083, St-12, Friction Stir Spot Welding, Intermetallic Compounds, Tensile-Shear Strength

*نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ   و نسخه ی پایانی آن در تاریخ   به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش جوشکاری دانشگاه صنعتی شریف
(۲) نویسنده مسئول: استادیار دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف
(۳) استاد دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف

DOI:

مقدمه

اهمیت ایجاد اتصال بین قطعاتی از جنس آلیاژهای آلومینیم و فولاد فراهم آوردن امکان استفاده از خواص ویژه این آلیاژها به صورت همزمان است. در حالی که آلیاژهای فولادی، استحکام لازم برای سازه‌ها را تضمین می‌کنند، آلیاژهای آلومینیم نیز موجب کاهش وزن و افزایش مقاومت به خوردگی این سازه‌ها می‌شوند [۱].

قطعات دوجنسی آلومینیم- فولاد در صنایع مختلفی همچون کشتی‌سازی، خودروسازی، هوافضا و شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه عمده کاربرد این قطعات در صنایع خودروسازی و کشتی‌سازی می‌باشد بطوریکه در بسیاری از خودروهای امروزی، بخش‌هایی از بدنه، کاپوت، صندوق عقب و اگزوزها از این قطعات ساخته می‌شوند.

با توجه به خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی کاملاً متفاوت آلیاژهای آلومینیم و فولاد، استفاده از روش‌های متداول جوشکاری ذوبی برای اتصال این آلیاژها به یکدیگر با مشکلاتی روبروست. اختلاف زیاد دمای ذوب آلیاژهای آلومینیم و فولاد منجر به ذوب ترجیحی آلومینیم نسبت به فولاد می‌شود. علاوه بر این با ذوب اجزای اتصال، میزان نفوذ و واکنش‌های شیمیایی نیز افزایش پیدا کرده که نتیجه آن تشکیل لایه‌های بین فلزی ترد Al-Fe با ضخامت زیاد است. حضور این لایه‌های ترد و ضخیم می‌توانند باعث شکست اتصال در حین انقباض حاصل از سردشدن و یا فرآیندهای شکل‌دهی شود. همچنین آلیاژهای آلومینیم ضریب انبساط حرارتی بیشتری نسبت به فولاد دارند و در نتیجه تنش‌های حرارتی حاصل در حین سردشدن جوش می‌تواند زمینه ساز شکست اتصال باشد.

به عنوان نوعی از فرآیندهای جوشکاری ذوبی، فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای اتصال ورق‌های آلومینیم به فولاد در صنایع مختلف استفاده می‌شود. اگرچه، این فرآیند برای اتصال‌دهی فلزات و آلیاژهای سبک دارای محدودیت‌هایی چون هدایت حرارتی و الکتریکی بالای فلزات سبک، مستهلک و فرسوده شدن الکترودها حین ایجاد اتصال، اعوجاج حرارتی زیاد و استحکام پایین اتصال می‌باشد [۲،۳،٤].

از سوی دیگر، استفاده از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به منظور ایجاد اتصال بین آلومینیم و فولاد منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد و ضخیم شده که می‌تواند کارآیی اتصال را به شدت تحت تاثیر قرار دهد [۲،۳].

فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای به عنوان شاخه‌ای از فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. حین این فرآیند، ابزار در حال چرخش تا عمق مشخصی (عمق نفوذ) به درون ورق‌هایی که بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند وارد می‌شود. پس از گذشت مدت زمان مشخص (مدت زمان ماند)، ابزار از درون قطعه کار خارج شده و سوراخی را بر جای می‌گذارد. حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک بین پین و قطعه کار منجر به نرم شدن مواد اطراف پین می‌شود. در نتیجه مواد حرارت دیده و نرم شده، تغییر شکل پلاستیک داده و در نهایت اتصال حالت جامد در فصل مشترک ورق‌های بالایی و پایینی برقرار می‌شود [٥].

فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای به عنوان جایگزین روش جوشکاری مقاومتی در حال ارزیابی است. این روش، آن‌گونه که شرکت مزدا ادعا کرده است، دارای بیش از ۹۰٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی و ٤۰٪ صرفه‌جویی در هزینه‌ی تجهیزات نسبت به فرآیند مقاومتی نقطه‌ای می‌باشد [٦]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای به عنوان یک فرآیند حالت جامد قادر است برخی معایب فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مانند تشکیل لایه‌های ضخیم بین فلزی و ذوب ترجیحی آلومینیم را تا حدود زیادی برطرف سازد.

البته به دلیل جدید بودن فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای در اتصال آلیاژهای آلومینیم به فولاد، تاکنون مطالعات چندانی در این زمینه انجام نپذیرفته است. سان و همکارانش [۷] به صورت موفقیت آمیزی آلومینیم آلیاژ Al-٦۰٦۱ و فولاد ساده کربنی را با استفاده از این فرآیند به یکدیگر متصل نمودند. مشاهدات آن‌ها حاکی از آن است که هیچ‌گونه

ترکیب بین فلزی Al-Fe در فصل مشترک اتصال تشکیل نشده اگر چه ساختاری آمورف درون آلومینیم در نزدیکی فصل مشترک دیده شده است. در تحقیق دیگری، چن و همکارانش [۸] به اتصال آلیاژ آلومینیم ٦٠٦١-T٦ و فولاد DC٠٤ پرداختند. مشاهدات فصل مشترک اتصال توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری نشان داد که هیچ‌گونه ترکیب بین فلزی تشکیل نشده است. محققین یاد شده معتقدند که برقراری یک اتصال اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای مستحکم در صورتی امکان‌پذیر خواهد بود که ترکیبات بین فلزی در امتداد فصل مشترک تشکیل نشده باشند. این در حالی است که نتایج گزارش شده توسط بوزی و همکارانش [۹] در اتصال اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیم ٦٠٦١-Al و فولاد عاری از بین‌نشین‌ها (interstitial free) حاکی از آن است که حضور بین فلزی‌ها در فصل مشترک به منظور دست‌یابی به استحکام مطلوب ضروری می‌نماید. موحدی و همکارانش [۱۰] به بررسی اتصالات نوردی آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ و فولاد St-۱۲ پرداخته‌اند در حالی که تاناکا و همکارانش [۱۱] جوشکاری اصطکاکی تلاطمی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T٦ و فولاد با کربن متوسط را مورد بررسی قرار داده‌اند. محققین یادشده معتقدند که تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در فصل‌مشترک اتصال، بدون توجه به ضخامت آن‌ها، منجر به کاهش استحکام اتصالات می‌گردد. از طرف دیگر، دسته‌ای دیگر از محققین معتقدند که شکل‌گیری ترکیبات بین‌فلزی با ضخامت کمتر از ۱۰ میکرومتر در فصل‌مشترک اتصال هیچ‌گونه تاثیر مخربی بر استحکام نداشته و حتی می‌تواند منجر به افزایش آن گردد. آن‌ها همچنین گزارش کرده‌اند که افزایش ضخامت بین‌فلزی‌ها به مقادیر بیشتر از ۱۰ میکرومتر، افت استحکام را به همراه خواهد داشت [۱۲،۱۳،۱٤]. در پژوهشی دیگر، موحدی و همکارانش [۱۵] تاثیر عملیات آنیل را بر روی استحکام اتصالات غیر همجنس اصطکاکی تلاطمی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳-Al و فولاد ۱۲ -Stمورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها حاکی از وجود ضخامت بحرانی ۲/٦ میکرومتری برای بین‌فلزی‌ها بوده است که در آن، حداکثر استحکام برای اتصالات حاصل شده‌است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تاکنون هیچ‌گونه توافقی در مورد تاثیر بین فلزی‌ها بر استحکام اتصالات غیرهمجنس حالت جامد آلومینیم و آهن حاصل نشده است.

متغیرهای مختلفی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای موثر می‌باشند که باید اثرات هر کدام از آن‌ها بر روی خواص جوش‌ها مورد بررسی قرار گیرد. از جمله این متغیرها می‌توان به هندسه، سرعت چرخشی، سرعت ورود، زمان ماند و عمق فروروی ابزار جوشکاری اشاره کرد. این متغیرها منجر به تاثیرگذاری بر روی مقدار حرارت تولیدی و همچنین سیلان پلاستیک مواد شده و در نتیجه خواص مکانیکی اتصالات را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. در پژوهش حاضر سعی بر آن است که تاثیر دو متغیر سرعت چرخشی و زمان ماند بر روی تشکیل بین فلزی‌ها و در نتیجه استحکام اتصالات اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیم Al-۵۰۸۳-H۳۲۱ و فولاد St-۱۲ مورد استفاده در این تحقیق (درصد وزنی)

منیزیم	منگنز	سیلیسیم	آهن	Al-۵۰۸۳-H۳۲۱
٤/٤۵	۰/٤۷	۰/٤۹	۰/۲	
فسفر و گوگرد	سیلیسیم	منگنز	کربن	St-۱۲ آنیل شده
کمتر از ۰/۵	۰/۰٤	۰/۵	کمتر از ۰/۱	

جدول ۲ خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیم Al-۵۰۸۳-H۳۲۱ و فولاد St-۱۲

درصد ازدیاد طول	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی ویکرز (HV20Kg)	
۷	۳۲۲	۲٦٤	۷۵/۷	Al-۵۰۸۳-H۳۲۱
٤۸	۲۸٤	۱۹۳	۷۳/۷	St-۱۲ آنیل شده

مواد و روش انجام تحقیق

مواد مورد استفاده در این تحقیق ورق‌های آلیاژ آلومینیم Al-۵۰۸۳-H۳۲۱ و فولاد St-۱۲ آنیل‌شده به ترتیب با ضخامت‌های ۳ و ۱ میلی‌متر بودند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق‌ها به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. در ابتدا نمونه‌ها در ابعاد ۱۰۰×۳۵ میلی‌متر تهیه شده و پس از آن سطوحی از ورق‌ها که قرار بود به یکدیگر متصل گردند، توسط برس آماده‌سازی مکانیکی شدند. سپس دو سطح یاد شده با میزان همپوشانی ۳۵ میلی‌متر بر روی یکدیگر گذاشته شدند به نحوی که ورق آلومینیمی در بالا و ورق فولادی در پایین قرار داشت. عملیات جوشکاری توسط دستگاه جوشکاری اصطکاکی تلاطمی و به صورت نقطه‌ای انجام پذیرفت به نحوی که جوش‌ها در مرکز ناحیه همپوشانی یاد شده با ابعاد ۳۵×۳۵ میلی‌متر واقع شدند. ابزار مورد استفاده دارای قطر شانه، قطر پین و ارتفاع پینی به ترتیب برابر با ۲۰، ۵ و ۳/۲ میلی‌متر بود. انتخاب ارتفاع پین یاد شده بدین دلیل بود تا بتوان از یک طرف سایش ابزار به واسطه ورود کم آن (۰/۲ میلی‌متر) به ورق فولادی را به حداقل رساند و از طرف دیگر نیز اتصال مطلوبی را ایجاد نمود. جنس ابزار یاد شده نیز از فولاد ابزار H-۱۳ عملیات حرارتی شده با سختی ۵۳ راکول C انتخاب گردید. سرعت‌های چرخشی ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه هر کدام برای مدت زمان‌های ماند ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه به منظور جوشکاری نمونه‌ها به کار گرفته شدند. شایان ذکر است که برقراری اتصال با اعمال سرعت‌های چرخشی کمتر از ۸۰۰ دور بر دقیقه امکان‌پذیر نبود. این در حالی است که اعمال سرعت‌های چرخشی بالاتر از ۱۱۰۰ دور بر دقیقه نیز منجر به سایش شدید و از بین رفتن پین حتی در زمان‌های ماند کوتاه می‌گردید. نرخ فروروی ابزار درون ورق‌ها برابر با ۰/۱۱ میلی‌متر بر ثانیه بود. استحکام کششی- برشی نمونه‌ها توسط دستگاه کشش Instron و با نرخ کششی برابر با ۵ میلی‌متر بر دقیقه تعیین شد و نتایج به صورت حداکثر نیروی قابل تحمل جوش‌ها ارائه گردید. مقادیر نیروی گزارش شده برای هر کدام از حالت‌های جوشکاری مربوط به میانگین ۳ آزمون می‌باشد. شایان ذکر است که به منظور جلوگیری از پیچش و عدم همراستایی ورق‌ها حین انجام آزمون کشش از قید و بند استفاده شد. مقاطع عرضی نمونه‌ها پیش و پس از آزمون کشش توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مشاهده گردید و ارتباط بین ریزساختار فصل مشترک اتصال و استحکام نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ورق‌های فولادی توسط محلول نایتال ۲ درصد حکاکی شدند در حالی که ورق‌های آلومینیمی با استفاده از محلول بارکر در ولتاژ ۲۰ ولت و به مدت زمان ۳ دقیقه حکاکی الکتروشیمیایی گردیدند. ترکیب شیمیایی محلول بارکر مورد استفاده در جدول (۳) گزارش شده است.

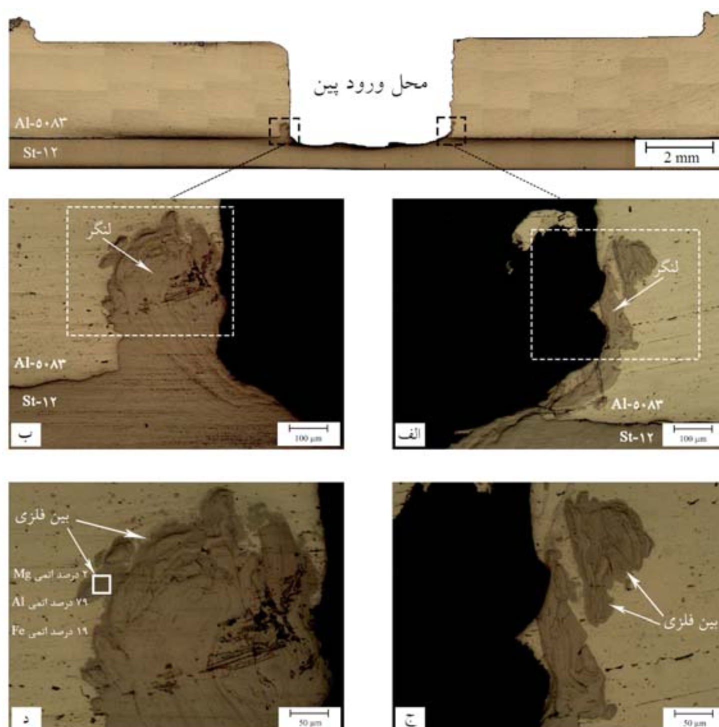
جدول ۳ ترکیب شیمیایی محلول بارکر مورد استفاده به منظور حکاکی الکتروشیمیایی ورق آلومینیم

نام محلول	ترکیب
بارکر (Barker)	۵ میلی لیتر HBF٤ در ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر

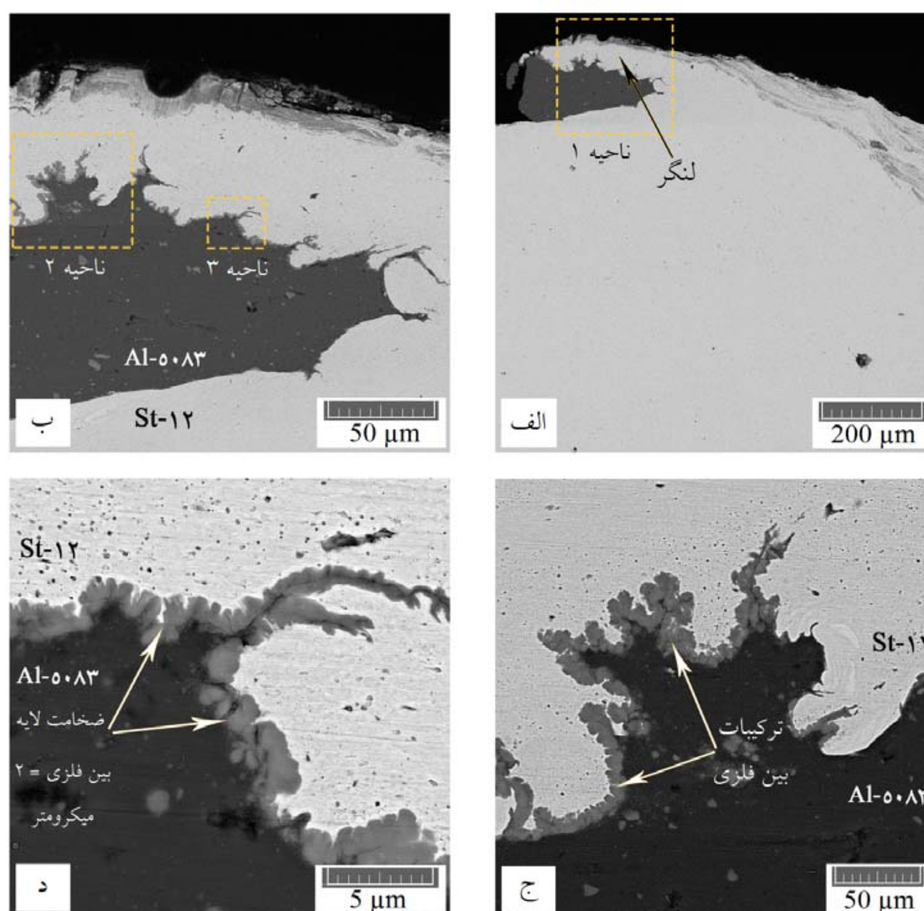
نتایج و بحث

مشاهدات ریزساختاری جوش قبل از آزمون کشش

نمای ماکروسکوپی از مقطع عرضی جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای در شکل (۱) دیده می‌شود. تصاویر با بزرگنمایی بالاتر از مناطق مشخص شده در نمای ماکروسکوپی در شکل‌های (۱ – الف و ب) نشان داده شده است. علاوه بر این، ریزساختارهای با بزرگنمایی بالاتر از مناطق نشان داده شده در شکل‌های (۱– الف و ب) نیز به ترتیب در شکل‌های (۱ – ج و د) به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که ذکر شد، در این تحقیق از ابزاری با قطر پین ۵ میلی‌متر استفاده شد که منجر به ایجاد حفره‌ای با قطر ۵ میلی‌متر در مرکز جوش و هنگام خروج پین از قطعه کار پس از اتمام فرآیند جوشکاری گردید. به دلیل آنکه ابزار مورد استفاده ارتفاع پینی برابر با ۳/۲ میلی‌متر داشت و ضخامت ورق آلومینیمی نیز ۳ میلی‌متر بود، تحت شرایطی که شانه ابزار به سطح قطعه کار رسید، ابزار به میزان ۰/۲ میلی‌متر به درون ورق فولادی وارد شد. نفوذ یاد شده منجر به سیلان مواد از ورق فولادی به سمت ورق آلومینیمی در نواحی اطراف پین گردید و در نهایت باعث ایجاد قفل‌های مکانیکی ماکروسکوپی (لنگر) شد. علاوه بر این، همان‌گونه که در شکل‌های (۱– ج و د) نشان داده شده است، بین فلزی‌های Al-Fe نیز در اطراف لنگرها به وجود آمده‌اند. نتایج آزمون EDS از مناطق یاد شده این موضوع را تایید می‌کند (شکل– ۱ د). همان‌گونه که دیده می‌شود، ترکیبات بین فلزی حاوی عناصر آهن، منیزیم و آلومینیم می‌باشند. گرچه شناسایی دقیق ترکیبات بین‌فلزی آهن و آلومینیم با استفاده از آزمون EDS امکان‌پذیر نمی‌باشد، اما تحقیقات انجام‌شده در زمینه زوج‌های نفوذی فولاد و آلومینیم در اتصالات حالت جامد نشان می‌دهد که لایه بین‌فلزی در فصل مشترک اتصال Fe_2Al_5 بوده و یا ترکیبی از دو زیر لایه $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 به ترتیب در مجاورت ورق‌های آلومینیمی و فولادی می‌باشد [۱۵ و ۱۶].



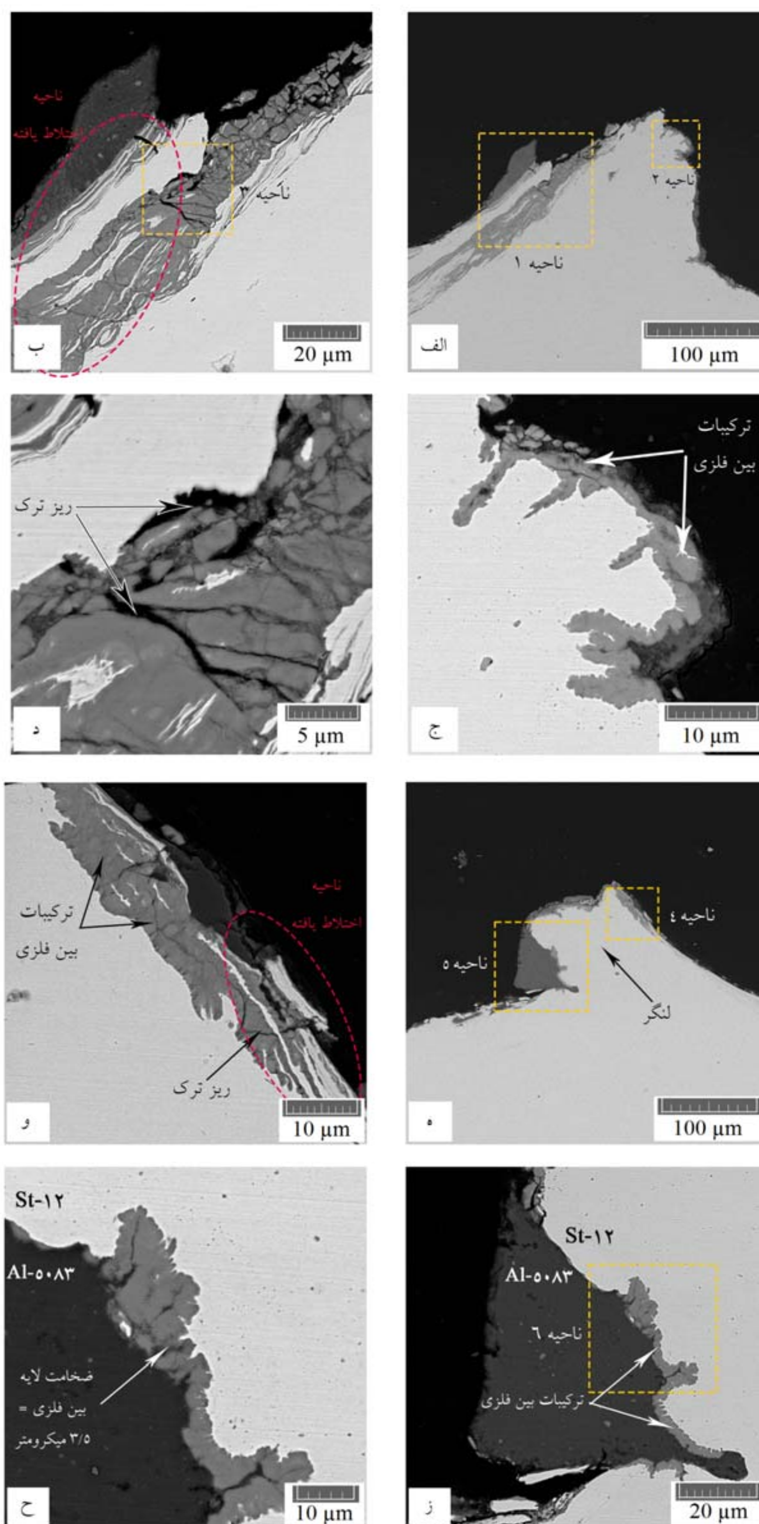
شکل ۱ نمای ماکروسکوپی از مقطع عرضی جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای به همراه: (الف) و (ب) ریزساختار نواحی اطراف لنگرها؛ (ج) و (د) بزرگنمایی مناطق مشخص شده در (الف) و (ب)؛ (د) ترکیب شیمیایی بین فلزی موجود در اطراف لنگرها



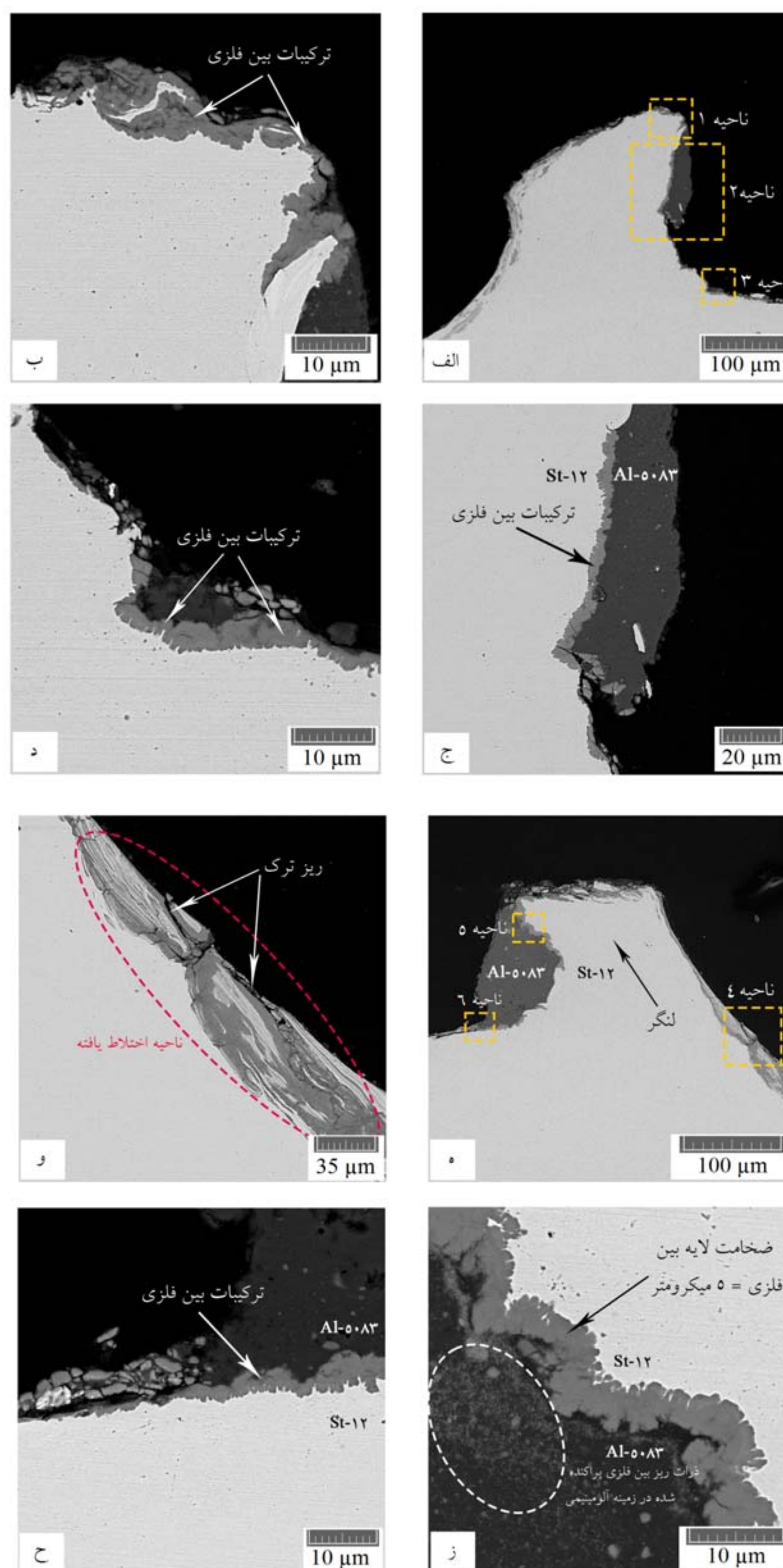
شکل ۲ مشاهدات ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی ورق فولادی پس از شکست در آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۵ ثانیه؛ (الف) نشان دهنده لنگر؛ (ب) بزرگنمایی ناحیه ۱ مشخص شده در شکل ۲ (الف)؛ (ج) و (د) بزرگنمایی نواحی ۲ و ۳ در شکل ۲ (ب)

بررسی ریزساختار ناحیه اتصال پس از آزمون کشش

مشاهدات ریزساختاری در طرف ورق فولادی. پس از شکست نمونه‌ها، از ورق‌های فولادی و آلومینیمی جدا شده مقاطع عرضی تهیه شد و بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی انجام پذیرفت. مشاهدات مربوط به ناحیه جدایش در ورق فولادی در شکل‌های (۲، ۳ و ٤) ارائه گردیده است. تصاویر نشان داده شده در شکل (۲) مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۵ ثانیه می‌باشند. همان‌گونه که در شکل (۲ – الف) دیده می‌شود، شکست این نمونه از نواحی اطراف لنگر رخ داده است. ریزساختار با بزرگنمایی بالاتر ناحیه ۱ شکل (۲– الف) در شکل (۲– ب) نشان داده شده است. این در حالی است که شکل‌های (۲ – ج) و (۲ – د) به ترتیب بیانگر ریزساختار نواحی ۲ و ۳ در شکل (۲ – ب) می‌باشند. مشاهده دقیق مناطق اطراف لنگر در شکل‌های (۲ – ج) و (۲ – د) حاکی از وجود بین فلزی‌ها در این نواحی است. علاوه بر این، بخشی از شکست نیز مربوط به آلومینیمی است که در مجاورت لنگر وجود داشته است (شکل ۲ – الف).



شکل ۳ مشاهدات ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی ورق فولادی پس از شکست در آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۰ ثانیه؛ (الف) و (ه) نشان دهنده لنگر؛ (ب) و (ج) بزرگنمایی نواحی ۱ و ۲ در شکل ۳ (الف)؛ (د) بزرگنمایی ناحیه ۳ در شکل ۳ (ب)؛ (و) و (ز) بزرگنمایی نواحی ۱و ۲ مشخص شده در شکل ۳ (الف)؛ (ح) بزرگنمایی بالاتر از ناحیه ٦ از شکل ۳ (ز)



شکل ٤ مشاهدات ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی ورق فولادی پس از شکست در آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه؛ (الف) و (ه) نشان دهنده لنگر؛ (ب)، (ج) و (د) بزرگنمایی نواحی ۱، ۲ و ۳ در شکل ٤ (الف)؛ (و)، (ز) و (ه) بزرگنمایی نواحی ۱، ۲ و ۳ در شکل ٤ (الف)

ضخامت ترکیبات بین فلزی موجود در فصل مشترک اتصال لنگر و ورق آلومینیمی برای نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری شد. بدین منظور، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر ضخامت گزارش شده مربوط به میانگین ضخامت در ۱۰ نقطه مختلف از ناحیه یاد شده برای هر نمونه می‌باشد. با توجه به ریزساختار ارائه شده در شکل (۲ - د) می‌توان گفت که تحت شرایط جوشکاری یاد شده، بین فلزی‌های Al-Fe با مورفولوژی پیوسته و ضخامت تقریبی ۲ میکرومتر در فصل مشترک اتصال بین لنگر و ورق آلومینیمی بوجود آمده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب سرعت چرخشی و مدت زمان ماند برای این نمونه به نحوی بوده است که شرایط را برای نفوذ متقابل اتم‌های آهن و آلومینیم در فصل مشترک اتصال فراهم نموده و منجر به تشکیل بین فلزی‌ها شده است. تصاویر نشان داده شده در شکل (۳) مربوط به نمونه جوشکاری شده با شرایط سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۱۰ ثانیه می‌باشد. همان طور که دیده می‌شود، مشاهدات ریزساختاری این نمونه برای هر دو لنگر صورت پذیرفته است. ریزساختار با بزرگنمایی بالاتر از نواحی ۱ تا ٦ به ترتیب در شکل‌های (۳- ب، ج، د، و، ز،ه) نشان داده شده‌اند. در این نمونه نیز شکست از نواحی اطراف لنگرها رخ داد و هیچ‌گونه شاهدی مبنی بر شکست از ورق فولادی وجود نداشت. علاوه بر این، هم‌چون نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ و مدت زمان ماند ۵ ثانیه، مقداری از شکست از ورق آلومینیمی در مجاورت یکی از لنگرها رخ داده است (شکل ۳ - ه). این در حالی است که در اطراف لنگر دیگر، آلومینیمی مشاهده نگردید (شکل ۳ - الف)). این موضوع نشان می‌دهد که شکست در اطراف لنگر یاد شده کاملاً از بین فلزی‌هایی رخ داده است که آن را احاطه نموده‌اند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که ضخامت بین فلزی‌ها در فصل مشترک ناحیه اتصال بین لنگر و ورق آلومینیم تقریباً ۳/۵ میکرومتر می‌باشد. منطقه مشخص شده در شکل (۳ - ب) تحت عنوان "ناحیه اختلاط یافته"متشکل از لایه‌های فولادی و ترکیبات بین فلزی می‌باشد که به واسطه اثرات چرخشی پین در فصل مشترک اتصال و اختلاط ورق‌ها به وجود آمده‌اند. مشاهده دقیق نواحی اختلاط یافته بیانگر وجود ریز ترک‌ها در این مناطق بود که عمدتاً درون بین فلزی‌ها حضور داشتند شکل‌های (۳ - ب، د و و). مشاهدات ریزساختاری مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۱۵ ثانیه در شکل (٤) نشان داده شده است. ریزساختار با بزرگنمایی بالاتر از نواحی ۱ تا ٦ به ترتیب در شکل‌های (٤- ب، ج، د، و، ز و ه) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود، کلیات گزارش شده برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۱۰ ثانیه در مورد این نمونه نیز صادق است. تنها تفاوت دو نمونه یاد شده به اختلاف ضخامت بین فلزی‌ها برمی‌گردد. به عبارت دیگر، با افزایش مدت زمان ماند از ۱۰ به ۱۵ ثانیه مدت زمان بیشتری دراختیار اتم‌های آهن و آلومینیم برای نفوذ در امتداد فصل مشترک قرار گرفته و در نتیجه ضخامت بین فلزی‌ها از ۳/۵ به ۵ میکرومتر افزایش یافته است.

مشاهدات ریزساختاری در طرف ورق آلومینیمی. به دلیل آنکه بخشی از شکست در آلومینیم مجاور لنگرها رخ داده است، به نظر می‌رسد که مشاهده تحولات ریزساختاری در این ناحیه ضروری می‌نماید. بدین منظور، مشاهدات ریزساختاری ورق آلومینیم در اطراف ناحیه شکست ناشی از آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۱۵ ثانیه پیش و پس از حکاکی الکتروشیمیایی صورت پذیرفت. بررسی‌های ریزساختاری قبل از حکاکی الکتروشیمیایی به منظور مشاهده بین فلزی‌ها توسط میکروسکوپ نوری انجام شد. این در حالی است که از حکاکی الکتروشیمیایی جهت مشاهده دانه‌بندی آلومینیم استفاده شد. تصاویر مربوطه در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. شکل (۵ - الف) مربوط به قبل از حکاکی الکتروشیمیایی بوده در حالی که شکل‌های (۵ - ب، ج و د) ریزساختارها را پس از حکاکی نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل (۵-

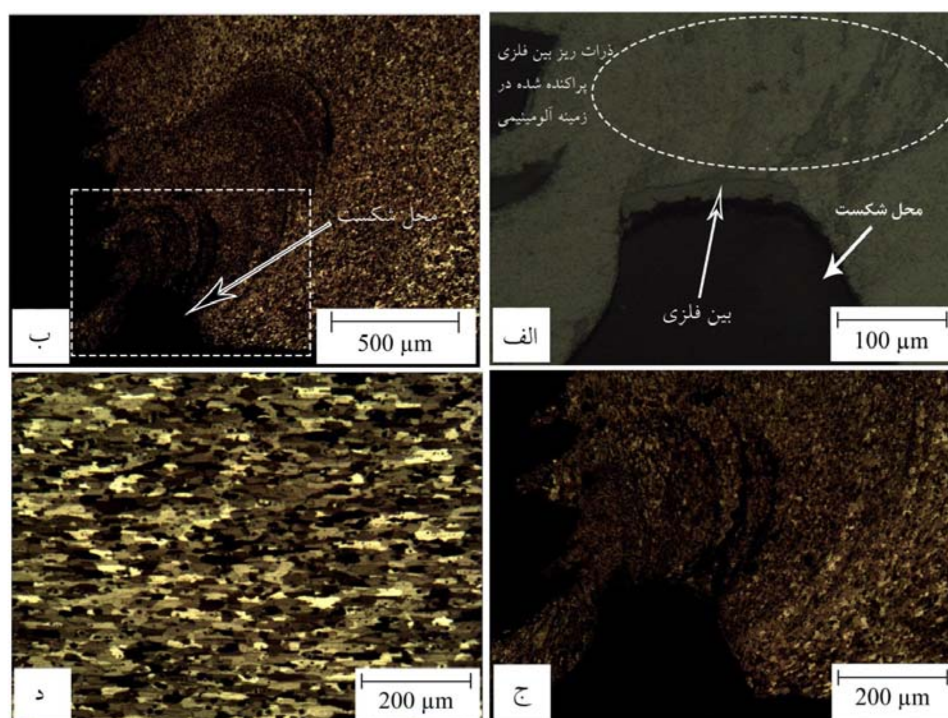
الف) دیده می‌شود، لایه‌های بین فلزی Al-Fe در اطراف ناحیه شکست حضور دارند. در واقع، بین فلزی‌های یاد شده و آن‌هایی که در اطراف لنگرها در شکل‌های (۲، ۳ و ٤) دیده شد، احتمالاً قبل از شکست ناشی از آزمون کشش به یکدیگر متصل بوده‌اند. در اثر وقوع شکست از بین فلزی‌های موجود در اطراف لنگرها حین آزمون کشش، بخشی از آنها در اطراف لنگرها و بخشی دیگر در اطراف ناحیه جدایش در ورق آلومینیمی باقی ماندند. علاوه بر بین فلزی‌های یاد شده، ذرات بسیار ریز و پراکنده از بین فلزی‌های Al-Fe در اطراف موضع شکست در ورق آلومینیمی مشاهده گردیدند شکل (۵ – الف). در واقع هنگام وارد شدن ابزار به درون ورق آلومینیمی و افزایش عمق فروروی آن، دمای ایجاد شده در فصل مشترک اتصال به واسطه تغییر شکل پلاستیکی شدید در اطراف پین افزایش خواهد یافت. هنگامی که دما و زمان کافی در اختیار اتم‌های آهن و آلومینیم در فصل مشترک اتصال قرار گیرد، ترکیبات بین فلزی در این ناحیه تشکیل خواهند شد. این ترکیبات در فصل مشترک اتصال دو ورق وجود دارند تا اینکه نوک پین به فصل مشترک اتصال رسیده و ترکیبات یاد شده را متلاشی نموده و پراکنده سازد. از طرف دیگر، با فروروی پین به درون ورق فولادی، شاهد سیلان فولاد از نواحی مجاور پین به سمت بالا و ورود آن به ورق آلومینیمی خواهیم بود که نتیجه آن تشکیل لنگر بوده است. مجموع دو عامل یاد شده باعث شد تا ترکیبات بین فلزی که ابتدا در فصل مشترک اتصال تشکیل شده بودند، با فروروی پین به درون ورق فولادی، متلاشی شده و به صورت ذرات بسیار ریز در نواحی مجاور لنگرها توزیع یابند. پدیده یاد شده به وضوح در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل (٤ – ز) دیده می‌شود. این در حالی است که ذرات یاد شده در فولاد دیده نشدند. در حقیقت در دمای فرآیند، از یک طرف ورق فولادی اغتشاش و تلاطم کمتری را نسبت به ورق آلومینیمی داشته (عمده اغتشاش مواد در ناحیه تلاطم یافته ورق آلومینیمی رخ می‌دهد) و از طرف دیگر نیز حین فروروی پین به درون ورق فولادی، لایه‌های ورق فولاد از نواحی اطراف پین به سمت ورق آلومینیمی حرکت کرده‌اند. عوامل یاد شده منجر به آن شد تا ذرات ریز و پراکنده از بین فلزی‌ها در سمت فولادی ناحیه اتصال حضور قابل توجهی نداشته باشند (شکل‌های ۲، ۳ و ٤).

شایان ذکر است که یکی از رسوبات مرسوم در آلیاژهای آلومینیم سری ۵xxx، ترکیبات آهن– آلومینیم– منگنز غنی از آهن می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به ریز بودن این رسوبات و همچنین ذرات بین فلزی Al-Fe جدا شده از فصل مشترک اتصال و همچنین شباهت نسبی ترکیب شیمیایی آنها، امکان تمایز دقیق رسوبات و ذرات بین فلزی Al-Fe با آنالیز EDS وجود ندارد. اما از آنجا که ذرات ریز نشان داده شده در شکلهای (٤ و ۵)، در اطراف لایه‌های بین فلزی تشکیل شده در لنگرها به صورت متمرکز پخش شده‌اند و در نواحی دور از اتصال و در فلز پایه با این تمرکز وجود ندارند، می‌توان نتیجه گرفت که این ذرات همان ترکیبات بین فلزی Al-Fe هستند که در اثر تلاطم ناشی از ابزار فرایند از فصل مشترک اتصال جدا شده و در زمینه آلومینیمی پخش شده‌اند. این درحالیست که می توان بخشی از ذرات موجود در اطراف لنگرها را به رسوبات غنی از آهن موجود در آلیاژهای آلومینیم سری ۵xxx نیز نسبت داد، اگرچه سهم آن‌ها چندان چشمگیر نیست.

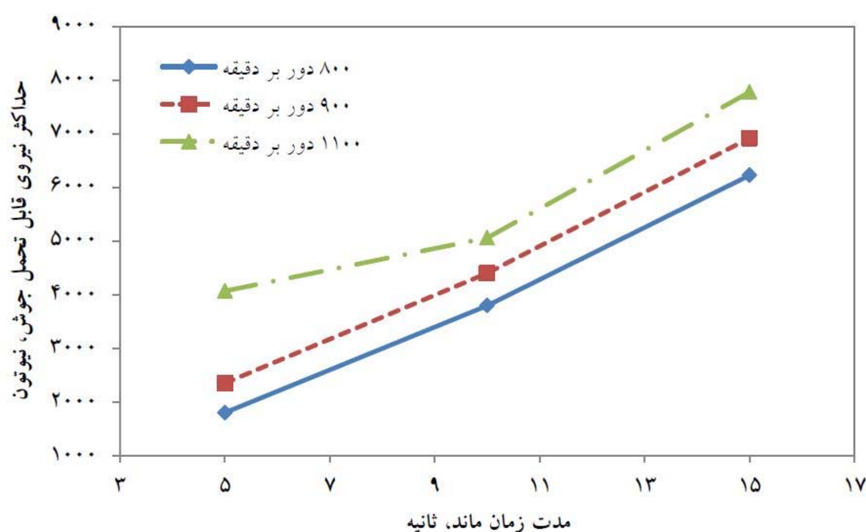
ریزساختار مربوط به ورق آلومینیم در نواحی بسیار دور نسبت به موضع جوشکاری در شکل (۵ – د) ارائه شده است. در واقع، فرآیند جوشکاری منجر به تغییرات ریزساختاری در این ناحیه نشده است و به عبارتی معرف ساختار آلومینیم پایه می‌باشد. مقایسه ریزساختارهای ارائه شده در شکل‌های (۵ – ج و د) نشان می‌دهد که فرآیند جوشکاری منجر به تشکیل دانه های بسیار ریز و هم محور در ناحیه مجاور پین گردیده است. ساختار یاد شده مشخصه ناحیه همزده شده (stirred zone) می‌باشد که در اثر وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی ایجاد می‌گردد. پدیده یاد شده به اثرات همزمان چرخش پین و حرارت اصطکاکی ناشی از آن حین فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی تلاطمی و

اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای نسبت داده شده است [۱۷]. در حقیقت می‌توان گفت که دانه‌بندی ناحیه همزده شده را اثرات متقابل دو پدیده تغییر شکل پلاستیکی و حرارت اصطکاکی مشخص می‌نماید. افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک منجر به ایجاد کرنش شدیدتری شده و ریز دانگی را به همراه دارد. از طرف دیگر، افزایش حرارت اصطکاکی درشت دانگی را در پی خواهد داشت.

نیروی شکست کششی- برشی نمونه‌ها. نیروی شکست کششی- برشی نمونه‌ها بر حسب تابعی از سرعت چرخشی و مدت زمان ماند در شکل (٦) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، جوش‌های ایجاد شده در مدت زمان‌های ماند ۵ ثانیه استحکام نسبتاً پایینی دارند. این در حالی است که با افزایش مدت زمان ماند به ۱۰ و در ادامه به ۱۵ ثانیه، استحکام نمونه‌ها به صورت پیوسته افزایش یافته است. روند یاد شده برای تمامی سرعت‌های چرخشی به کار گرفته شده در این تحقیق برقرار است. علاوه بر این، در یک مدت زمان ماند یکسان، جوش‌های ایجاد شده با سرعت‌های چرخشی بالاتر از مقادیر استحکام بیشتری بهره می‌برند. بنابراین، روند تغییرات نیروی شکست بر حسب سرعت چرخشی و مدت زمان ماند به نحوی بود که جوش با کمترین نیروی شکست ۱۷۹۷ نیوتون در سرعت چرخشی ۸۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۵ ثانیه بدست آمد. حداکثر نیروی شکست نیز برابر با ۷۷۷۳ نیوتون بود که مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۱۵ ثانیه بود.



شکل ۵ مشاهدات ریزساختاری ورق آلومینیمی پس از شکست برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه؛ (الف) قبل از حکاکی الکتروشیمیایی؛ (ب)، (ج) و (د) پس از حکاکی؛ (ج) ریزساختار با بزرگنمایی بالاتر از ناحیه مشخص شده در شکل ۵ (ب)؛ (د) ریزساختار آلومینیم پایه



شکل ٦ تغییرات حداکثر نیروی قابل تحمل جوش بر حسب سرعت چرخشی و مدت زمان ماند اعمال شده

همان‌گونه که نتایج آزمون کشش نشان داد، در تمامی سرعت‌های چرخشی مورد استفاده در این تحقیق، با افزایش مدت زمان ماند از ۵ به ۱۵ ثانیه استحکام جوش‌ها افزایش چشمگیری را از خود نشان داد. علاوه بر این، در هر کدام از مدت زمان‌های ماند ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه، اعمال سرعت‌های چرخشی بالاتر منجر به ایجاد جوش‌های مستحکم‌تری گردید. نتایج حاصل از مطالعات محققین نشان می‌دهد که اعمال سرعت‌های چرخشی بالاتر و همچنین مدت زمان‌های ماند طولانی‌تر باعث تولید حرارت ورودی بیشتر و در پی آن افزایش دما در موضع اتصال می‌گردد [۱۸]. این موضوع منجر به نفوذ هر چه بیشتر اتم‌های آهن و آلومینیم در فصل مشترک اتصال شده و آنچنان که در شکل‌های (۲، ۳ و ٤) نشان داده شد، موجبات افزایش ضخامت بین فلزی‌ها را فراهم می‌کند. در پی افزایش ضخامت یاد شده، پیوندهای متالورژیکی مستحکم‌تری در فصل مشترک اتصال شکل گرفته که می‌تواند منجر به افزایش استحکام اتصالات گردد.

با توجه به ریزساختارهای ارائه شده در شکل‌های (۲، ۳، ٤ و ۵) دیده شد که شکست تمامی نمونه‌ها عمدتاً از بین فلزی‌های موجود در اطراف لنگرها بود و سهم کمی از آن نیز مربوط به شکست از آلومینیم مجاور لنگرها می‌شد. وقوع چنین نحوه شکستی را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

(الف) وجود بین فلزی‌ها با مورفولوژی پیوسته در اطراف لنگرها. همان‌گونه که در شکل‌های (۳ – د)، (۳ – و) و (٤ – و) دیده شد، این بین فلزی‌ها می‌توانند به عنوان مکان‌های مستعد برای جوانه زنی و اشاعه ترک‌ها عمل کرده و استحکام اتصالات را کاهش دهند.

(ب) تقویت آلومینیم مجاور لنگرها به واسطه دو عامل:

(۱) ریز دانگی شدید آلومینیم در این ناحیه. آن‌چنان که با مقایسه شکل‌های (۵ – ج) و (د) دیده می‌شود، ناحیه همزده شده دانه‌بندی بسیار ریزتری را نسبت به آلومینیم پایه داراست. این پدیده به وضوح نشان می‌دهد که گرچه اعمال سرعت‌های چرخشی و زمان‌های ماند بالا منجر به افزایش حرارت ورودی گردیده و می‌تواند

باعث درشت دانگی شود، اما افزایش کرنش پلاستیکی که در اثر افزایش سرعت چرخشی ایجاد شده است، در اینجا غالب بوده و ریزدانگی را به همراه داشته است.

(۲) وجود ذرات بسیار ریز و پراکنده از بین فلزی‌های Al-Fe که با توزیع خود در زمینه نرم آلومینیمی می‌توانند به عنوان ذرات تقویت کننده فاز ثانویه در کامپوزیت‌ها عمل کرده و منجر به افزایش استحکام گردند. اگرچه ذرات بین فلزی یاد شده توزیع چندان یکنواختی در ساختار ندارند، اما از آنجا که تجمع آنها در نواحی تمرکز تنش در مجاورت لنگرهاست که شکست تمامی نمونه‌ها نیز از این نواحی رخ داده است، می‌توانند با افزایش استحکام آلومینیم در نواحی مجاور لنگرها باعث افزایش نیروی شکست اتصال شوند.

مجموع دو عامل یاد شده برای تقویت آلومینیم مجاور لنگرها و همچنین وجود بین فلزی‌های پیوسته در مجاورت لنگر باعث شد تا شکست به طور کامل از آلومینیم رخ نداده و ترکیبی از شکست از بین فلزی‌ها و آلومینیم اتفاق بیفتد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت لایه بین فلزی در فصل مشترک اتصال تا مقادیر ۵ میکرومتر می‌تواند منجر به افزایش استحکام کششی- برشی جوش‌ها گردد. شایان ذکر است که مقادیر ضخامت بین فلزی بالاتر از ۵ میکرومتر در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است. بر اساس آن‌چه ذکر شد، برخی از محققین معتقدند که افزایش استحکام توسط بین فلزی‌ها حد معینی دارد که در ضخامت‌های بیش از آن ممکن است استحکام کاهش یابد [۱۲،۱۵]. در حقیقت، ایجاد چنین ضخامتی از بین فلزی‌ها مستلزم اعمال حرارت ورودی بالاتر بود که نیاز به سرعت‌های چرخشی بالاتر و یا زمان‌های ماند طولانی‌تر داشت. همان‌گونه که اشاره شد، در چنین شرایطی بحث سایش ابزار مطرح می‌گردید که یک محدودیت بود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر تغییر سرعت چرخشی و زمان ماند ابزار و در نتیجه آن تغییر ضخامت لایه‌های بین فلزی Al-Fe بر استحکام جوش‌های اصطکاکی تلاطمی نقطه ای غیر همجنس آلومینیم- فولاد مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده عبارتند از:

(۱) در تمامی سرعت‌های چرخشی ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه، با افزایش مدت زمان ماند از ۵ به ۱۵ ثانیه، استحکام جوش‌ها افزایش یافت.

(۲) در مدت زمان‌های ماند مشابه، به کارگیری سرعت های چرخشی بالاتر منجر به دستیابی به جوش‌های مستحکم‌تر گردید.

(۳) ضخامت بین فلزی‌های Al-Fe در فصل مشترک لنگر و آلومینیم مجاور برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ماند ۵ ثانیه برابر با ۲ میکرومتر بود. این در حالی است که با بکارگیری سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان‌های ماند ۱۰ و ۱۵ ثانیه، ضخامت بین فلزی‌ها به ترتیب به ۳/۵ و ۵ میکرومتر افزایش یافت. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش ضخامت بین فلزی‌ها در محدوده یاد شده، استحکام جوش‌ها افزایش می‌یابد.

(٤) شکست تمامی نمونه‌ها عمدتاً از لایه‌های بین فلزی اطراف لنگرها بود و سهم کمی از آن نیز به آلومینیم مجاور لنگر برمی‌گشت.

(۵) افزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک اتصال تا مقادیر ۵ میکرومتر منجر به افزایش استحکام اتصالات گردید.

مراجع

1. Connolly C., “Friction spot joining in aluminium car bodies”, *Industrial Robot*, Vol. 34, pp. 17-20, (2007).

2. Jiang W.H., Kovacevic R., “Feasibility study of friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy with AISI 1018 steel”, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 218, pp. 1323-1331, (2004).

3. Chen C.M., Kovacevic R., “Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding”, *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 44, pp. 1205-1214, (2004).

4. Song J.L., Lin S.B., Yang C.L., Fan C. L., “Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum-steel TIG welding-brazing joint’’, *Journal of Alloys and Comounds*, Vol. 488, pp. 217-222, (2009).

5. Lathabai S., Painter M.J., Cantin G.M.D., Tyagi V.K., ‘‘Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy’’, *Scripta Materialia*, Vol. 55, pp. 899-902, (2006).

6. "Mazda Develops World's First Aluminum Joining Technology Using Friction Heat", Mazda News Release, February 27, 2003, http://www.mazda.com/publicity/release/200302/0227e.html.

7. Sun Y.F., Fujii H., Takaki N., Okitsu Y. ‘‘Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique’’, *Materials and Design*, Vol. 47, pp. 350-357, (2013).

8. Chen Y.C., Gholinia A., Prangnell P.B., ‘‘Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet’’, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 134, pp. 459-463, (2012).

9. Bozzi S., Helbert-Etter A.L., Baudin T., Criquic B., Kerbiguet G.J., ‘‘Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds’’, *Materials Science and Engineering* A, Vol. 527, pp. 4505-4509, (2010).

10. Movahedi M., Kokabi A.H., Seyed Reihani S.M., ‘‘Investigation on the bond strength of Al-1100/St-12 roll bonded sheets, optimization and characterization’’, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3143-3149, (2011).

11. Tanaka T., Morishige T., Hirata T., ‘‘Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys’’, *Scripta Materialia*, Vol. 61, pp. 756-759, (2009).

12. Danesh Manesh H., Karimi Taheri A., ‘‘The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet’’, *Materials and Design*, Vol. 24, pp. 617-622, (2003).

13. Padmanabhan R., Oliveira M.C., Menezes L.F., ‘‘Deep drawing of aluminium-steel tailor-welded blanks’’, *Materials and Design* Vol 29, pp. 154-160, (2008).

14. Zhang H.T., Feng J.C., He P., Hackl H., ‘‘Interfacial microstructure and mechanical properties of

aluminium-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process'', *Materials Characterization*, Vol. 58, pp. 588-592, (2007).

15. Movahedi M., Kokabi A.H., Seyed Reihani S.M., Cheng W.J., Wang C.J., ''Effect of annealing treatment on joint strength of aluminum/steel friction stir lap weld'', *Materials and Design*, Vol. 44, pp. 487-492, (2013).
16. Springer H., Kostka A., Payton E.J., Raabe D., Kaysser-Pyzalla A., Eggeler G., ''On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys'', *Acta Materialia*, Vol. 59, pp. 1586-1600, (2011).
17. Rosendo T., Parra B., Tier M.A.D., da Silva A.A.M., dos Santos J.F., Strohaecker T.R., et al., "Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1094-1100, (2011).
18. Movahedi M., Kokabi A.H., Seyed Reihani S.M., Najafi H., ''Effect of tool travel and rotation speeds on weld zone defects and joint strength of aluminium steel lap joints made by friction stir welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17(2), pp. 162-167, (2012).